

En plus des risques classiques associés à toute activité industrielle, la fabrication additive utilisant des poudres métalliques comporte des risques spécifiques liés aux produits mis en œuvre ou générés. Les opérations annexes, comme la préparation et la récupération des poudres, la récupération et la finition des objets fabriqués, la maintenance sont plus exposantes que la fabrication proprement dite. Pour la majorité des poudres métalliques, le risque chimique s'accompagne également du risque d'incendie et d'explosion. Les principales solutions de prévention visent à limiter l'exposition par le travail en circuit fermé, par le captage des polluants et par l'organisation du travail.



Fabrication additive ou impression 3D utilisant les poudres métalliques

INTRODUCTION

La fabrication additive, communément appelée « impression 3D », consiste à obtenir des objets par addition de matière en couches successives. Initialement réservée au prototypage, cette technique se développe pour des applications industrielles, notamment dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, de la médecine ou de l'architecture.

Types de matières premières

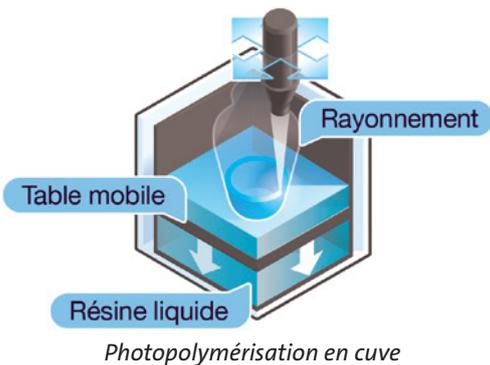
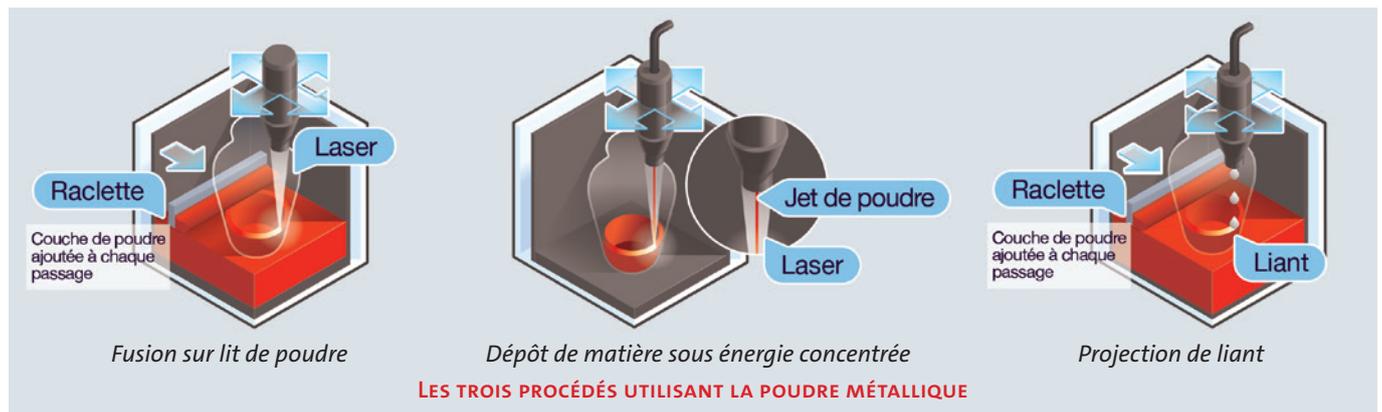
De très nombreuses matières ont été et sont testées dans cette technologie. Le chocolat, le béton et les cellules vivantes représentent quelques exemples inédits de matières qui sont utilisées dans la fabrication additive. Néanmoins, trois familles de matières premières sont le plus souvent rencontrées : les polymères, les métaux et les céramiques. Ce document traite des risques et des principales mesures de prévention associées

à la fabrication additive utilisant des poudres métalliques.

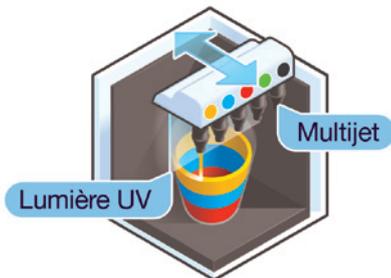
Types de fabrication

À l'heure actuelle, la norme NF EN ASTM ISO 52900 et la collection de normes NF EN ISO 17296 – 2 à 4 définissent sept grands procédés de fabrication additive. Ce domaine étant en plein essor, d'autres procédés de fabrication additive sont en cours de développement.

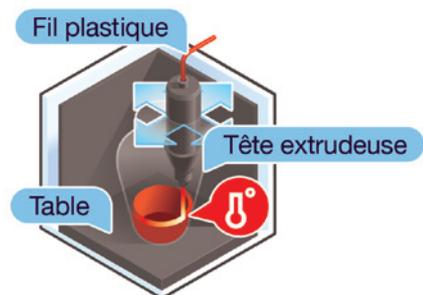
Figure 1. Procédés de fabrication additive



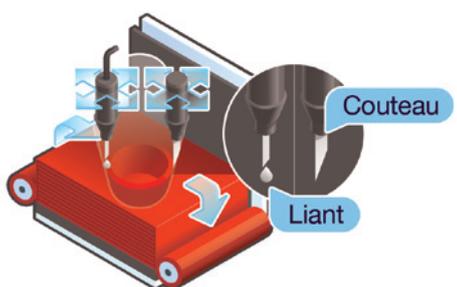
Photopolymérisation en cuve



Projection de matière



Extrusion de matière



Stratification en couches

• **Fusion sur lit de poudre**

L'énergie thermique (rayon laser, faisceau d'électrons...) fait fondre de manière sélective le matériau de fabrication présent sous forme de poudre.

• **Dépôt de matière sous énergie concentrée**

Un premier système dépose, de manière sélective, la matière. Un second système apporte de l'énergie thermique (rayon laser, faisceau d'électrons...) qui fait fondre la matière au fur et à mesure qu'elle est déposée.

• **Projection de liant**

Un agent liquide est déposé de manière sélective pour lier le matériau de fabrication qui est sous forme de poudre.

• **Photopolymérisation en cuve**

Un photopolymère liquide est durci de manière sélective par un rayonnement spécifique.

• **Projection de matière**

Des gouttelettes de matériau sont déposées de manière sélective.

• **Extrusion de matière**

Le matériau est distribué de manière sélective par une buse.

• **Stratification en couches**

Les couches de matériau sont liées de manière sélective pour former l'objet à fabriquer.

Procédés utilisant la poudre métallique

Parmi les procédés utilisés dans la fabrication additive, la **projection de liant**, la **fusion sur lit de poudre**, et le **dépôt de matière sous énergie concentrée** sont ceux qui peuvent mettre en œuvre des poudres métalliques. Aujourd'hui, pour ce type de matière

première, la technologie la plus répandue est la fusion sur lit de poudre.

1. IDENTIFICATION DES RISQUES

La fabrication additive utilisant des poudres métalliques présente des risques génériques, liés par exemple à la manutention, à l'électricité, aux récipients sous pression, et des risques particuliers liés aux processus et aux produits mis en œuvre ou générés. L'ensemble des risques doit faire l'objet d'une évaluation spécifique formalisée dans le document unique, conduisant à la mise en place de mesures, tant techniques qu'organisationnelles, afin de supprimer ou de réduire les risques identifiés.

Dans la suite du document, seuls les risques intrinsèques aux produits ou co-produits (qui sont principalement les risques chimiques et le risque d'incendie/explosion) et les principales mesures de prévention associées seront plus spécifiquement détaillés.

Identification des risques chimiques

L'identification des risques liés aux différents produits passe par l'inventaire de tous les produits entrants, sortants et des sous-produits (produits de dégradation) et ceci à toutes les étapes du procédé. Les caractéristiques (physicochimiques, dangers,...) doivent être identifiées à l'aide des sources d'information disponibles : bases de données, fiches de données de sécurité, fiches toxicologiques...

Poudres métalliques

Les poudres métalliques utilisées peuvent contenir de l'aluminium, du titane, du manganèse, du zinc, du tungstène, du niobium, du nickel, du cobalt, du fer, du cadmium... La majorité des poudres métalliques présente des risques pour la santé lors de l'exposition par inhalation ou par voie cutanée. Les poudres contenant (au-dessus d'un certain

seuil) du nickel et du cadmium sont classées cancérigènes. De plus, même si le métal n'a pas d'effet spécifique sur la santé, la taille de la poudre peut être suffisamment fine pour provoquer des effets, comme des difficultés respiratoires ou de l'asthme.

Tous ces produits sont combustibles ou inflammables, voire pyrophoriques (s'enflamment spontanément à l'air) pour certaines poudres d'aluminium ou de magnésium.

La granulométrie étant très faible, ces poudres fines sont très réactives et sensibles à l'inflammation. Elles peuvent, en présence d'une source d'inflammation (surface chaude, flamme, étincelle...), soit, sous forme de couche, générer un incendie, soit, en suspension dans l'air, générer une explosion.

De plus, la majorité de ces poudres réagit avec l'eau en formant de l'hydrogène, un gaz extrêmement inflammable et explosif.

Sous-produits (produits de dégradation)

D'autres risques sont générés par les produits formés lors de la transformation des poudres métalliques. Sous l'effet de la température, les métaux forment des oxydes. Par exemple, les oxydes de nickel, chrome, cadmium, cobalt (oxyde de chrome VI, oxyde de nickel II, III, IV, oxyde de cobalt III) sont cancérigènes.

Produits d'entretien/nettoyage

Des produits (isopropanol, acétone...) sont utilisés pour l'entretien, le nettoyage ou la maintenance. Ils représentent une autre source de risques en fonction de leur composition et des caractéristiques des substances qui les composent.

Gaz d'inertage

Les gaz (argon, azote...) utilisés pour empêcher l'oxydation (et l'inflammation) de certains métaux présentent un risque d'hypoxie car leur présence dans l'atmosphère de travail (en cas de fuite ou d'ouverture de la machine avant la remise sous air, par exemple) diminue la quantité d'oxygène disponible pour la respiration.

Liants

Le cyanoacrylate de méthyle est un des liants les plus utilisés dans la fabrication additive par projection de liant. Ce produit est irritant pour la peau, les yeux et les voies respiratoires.

2. PRÉVENTION DES RISQUES CHIMIQUES

Les risques mécanique, électrique et ceux liés aux rayonnements doivent être pris en compte lors de la conception de la machine en respectant les règles techniques prévues par la directive « Machine » 2006/42 CE transposées dans le Code du travail à l'annexe I de l'article R. 4312-1. Les risques chimiques et ceux liés à l'incendie/explosion sont, quant à eux, partiellement pris en compte dans ce cadre. De plus, ces risques existent aussi lors d'autres étapes du procédé de fabrication : stockage, nettoyage, finition des pièces, maintenance de la machine...

L'évaluation des risques passe par une cartographie des différentes zones d'utilisation des produits dangereux et des tâches réalisées. Le niveau d'exposition est principalement déterminé par la tâche et les propriétés physicochimiques du produit manipulé. Par tâche, on entend le mode opératoire ainsi que le matériel utilisé. La quantité et la fréquence influent aussi sur l'exposition.

La démarche de prévention des risques chimiques ne se limite pas à l'évaluation des risques mais doit être poursuivie par la mise en place d'actions concrètes de prévention et de protection visant à supprimer ou à limiter le risque, hiérarchisées en fonction des priorités et des délais de réalisation.

Principes de prévention

Substitution

Substituer, si c'est technologiquement possible, les produits les plus dangereux par des alternatives moins dangereuses (par exemple, remplacement d'un solvant de nettoyage inflammable par un qui ne l'est pas, poudres riches en nickel, cobalt, chrome par d'autres moins riches...).

Circuit fermé

Travailler autant que possible en vase clos sur l'ensemble des étapes (manipulation des poudres, fabrication, finition, nettoyage...).

Ventilation/Captage à la source

Dans les situations où le travail en vase clos n'est pas techniquement possible, l'emploi d'un dispositif d'aspiration avec captage au plus près de la source d'émission est nécessaire [1]. Les vitesses d'air de transport dans les conduits doivent être adaptées aux polluants transportés. Pour les poudres, un

minimum de 20 m/s est requis afin d'éviter les dépôts dans les canalisations. L'air pollué doit être rejeté à l'extérieur, après traitement le cas échéant.

Ventilation générale et apport d'air neuf

En complément des systèmes de captage localisés, une ventilation générale doit être installée afin de fournir aux locaux de l'air neuf et diluer les polluants résiduels. Le débit de compensation en air neuf doit prendre en compte le débit de la ventilation générale ainsi que les débits des différents systèmes de captage. L'air neuf ne doit, en aucun cas, provenir d'un local à pollution spécifique. De surcroît, la maîtrise des flux d'air permet d'aménager des locaux en dépression par rapport aux locaux contigus, afin d'éviter aux polluants d'être diffusés dans les différentes pièces à proximité.

Mesures organisationnelles

Lors de l'acquisition d'une nouvelle machine, la possibilité de travailler au maximum en vase clos au niveau de la machine (boîte à gant intégrée, système et outils de nettoyage intérieur intégrés...) doit être ajoutée au cahier des charges. Le but est de séparer les activités polluantes des activités non polluantes ; les tâches polluantes doivent être effectuées sur des postes de travail aménagés pour diminuer l'exposition (captage, travail en enceinte semi-fermée ou fermée). En complément, l'accès aux locaux de fabrication additive doit être limité aux personnes habilitées. Une maintenance préventive sur les machines de fabrication additive (remplacement des éléments d'étanchéité, des tuyaux souples...) permet de garantir l'efficacité des systèmes de protection mis en place.

EPI

En complément des mesures de protection collective qui doivent être privilégiées, des équipements de protection individuelle peuvent être utilisés. Il s'agit principalement de gants étanches aux poudres et aux solvants utilisés (gants en nitrile, par exemple), appareils de protection respiratoire [2] filtrants équipés de filtres P2 ou P3 (selon la nature des poudres) combinés, le cas échéant, à des filtres anti-gaz (des appareils à ventilation assistée sont conseillés pour des durées de port supérieures à une heure), de vêtements de protection anti-statiques étanches aux poudres (type 5), de chaussures de sécurité anti-statiques. En raison du risque d'incendie/explosion de certaines poudres, des EPI et vêtements de travail composés de tissu difficilement inflammable sont à privilégier.

Formation/Information

Les salariés sont informés sur les risques présents dans l'entreprise et les dangers des produits. Ils doivent être formés à l'utilisation des moyens de protection collective et individuelle et à celle des moyens d'extinction (extincteurs, notamment) mis en place

TRAITEMENT DE L'AIR

Pour certains réseaux de transport d'air pollué, il peut être nécessaire de traiter l'air avant de le rejeter à l'extérieur, notamment si la concentration en polluants est trop importante. Afin de limiter le risque d'incendie et d'explosion, le traitement de l'air par voie humide est préférable au traitement de l'air par voie sèche. Attention toutefois à la formation d'hydrogène lors de cette étape pour les métaux facilement oxydables.

ainsi que sur la démarche à adopter en cas de survenance d'un sinistre (urgence médicale, incendie...).

3. MESURES DE PRÉVENTION POUR LES PRINCIPALES TÂCHES

Avant la mise en œuvre

Réception, reconditionnement et transfert des matières premières

Lire l'étiquetage et prendre connaissance des fiches de données de sécurité (FDS) des produits, utiliser et respecter les consignes stipulées dans ces dernières. Vérifier le bon étiquetage des récipients en concordance avec la FDS. Éviter les conteneurs non étanches, souillés ou abîmés. Limiter le transvasement ou, à défaut, le faire en circuit fermé ou sur des postes de travail ventilés (cabine ouverte, table avec fente d'aspiration arrière...). N'utiliser que des récipients spécifiques et adaptés aux différents produits.

Stockage

Stocker les produits chimiques ou les déchets dans des locaux frais, ventilés, à l'abri des rayonnements solaires ou de toute autre source de chaleur. Les emballages doivent être étanches, en bon état et fermés soigneusement après chaque utilisation. Le stockage nécessite un système de ventilation mécanique générale afin de limiter l'accumulation de produits dangereux dans l'atmosphère.

Mise en œuvre

Préparation de la charge

Préparer les éventuelles charges sur un poste de travail ventilé (table avec fente d'aspiration arrière, cabine ouverte...). Alimenter la machine en matière première en vase clos, à défaut prévoir un système de captage (bras aspirant, anneau de Pouyès...) au niveau de l'ouverture de remplissage.

Fabrication *in situ* dans la machine

Utiliser des machines étanches adaptées aux types de poudres. Le travail sous atmosphère inerte permet de protéger le métal de l'oxydation et limite, voire supprime, le risque d'incendie/explosion pour les poudres inflammables (Al, Mg, par exemple).

Fin de la fabrication

Ne pas ouvrir la machine avant la fin de la fabrication. Laisser une temporisation finale en gardant un débit de gaz inerte ou un débit d'aspiration afin d'évacuer les produits d'oxydation ou de dégradation. Aspirer les rejets de la machine et les rejeter à l'extérieur, après filtration si nécessaire. Utiliser un système de boîte à gants pour enlever du plateau la matière non utilisée, pour nettoyer la pièce, le plateau/le support des pièces et pour nettoyer l'intérieur

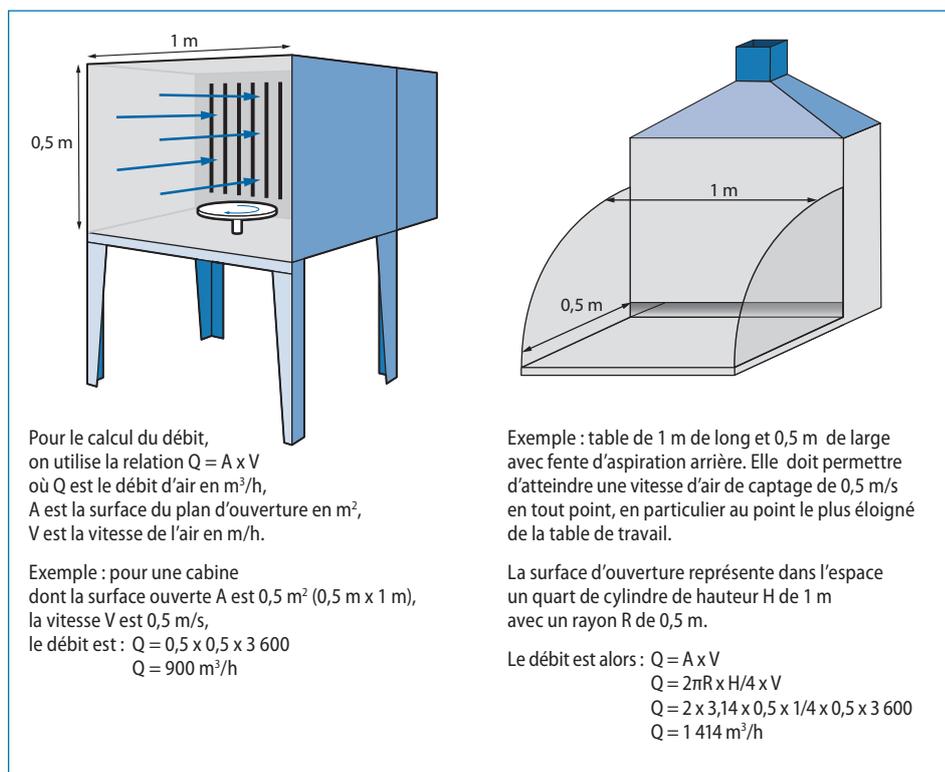


Figure 2. Poste de travail ventilé (cabine, table avec fente d'aspiration arrière)

de la machine. Privilégier les machines qui disposent d'un système d'aspiration intégré des poudres permettant de mieux récupérer la matière non utilisée du plateau. Récupérer la matière non utilisée via un système en circuit fermé.

Note : dans la base de données d'exposition professionnelle de l'INRS et dans des publi-

cations scientifiques sur le sujet, des valeurs d'exposition individuelle deux fois supérieures à la VLEP française ou allemande pour le cobalt, le nickel ou le cuivre ont été rencontrées pour des opérations d'ouverture d'une machine sans boîte à gants [R. Beisser – Gefahrstoffe-Reinhalt. Luft 77 (2017) N° 11/12, p. 487-496].

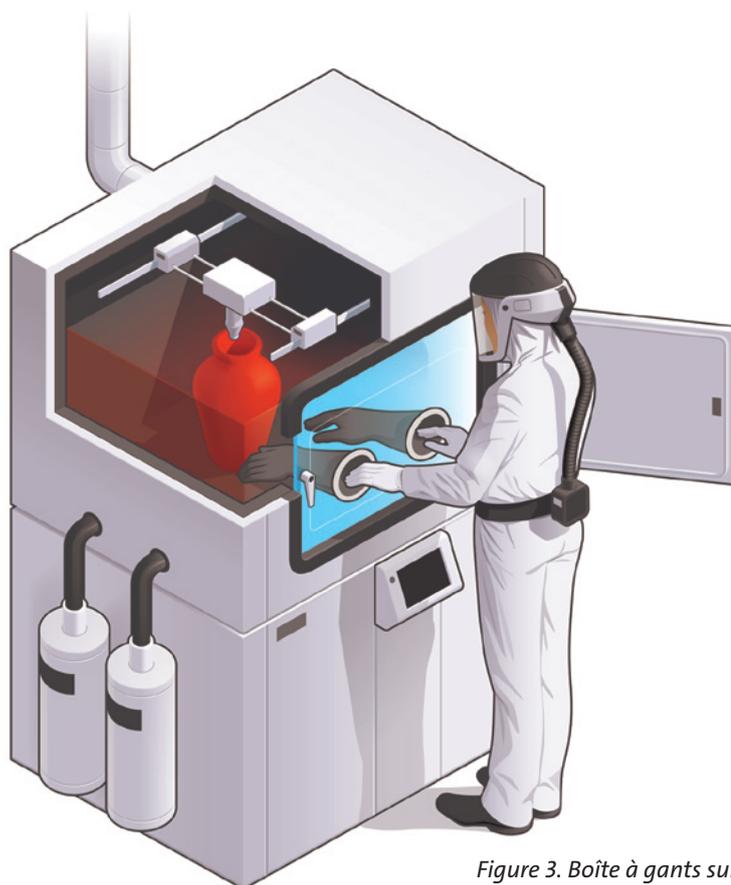


Figure 3. Boîte à gants sur la machine

Post-traitement

Finition des pièces

Effectuer les opérations de post-traitement (découpe, ponçage, perçage) sur un poste ventilé avec des vitesses d'air de 0,5-1 m/s (ou supérieures en fonction de la vitesse initiale des polluants) au point d'émission des polluants.

L'utilisation de soufflettes est à limiter au nettoyage final de la pièce et à condition que cette opération s'effectue dans une enceinte étanche mise en dépression par un dispositif d'aspiration.

Si des fluides de coupe sont utilisés, aspirer les aérosols produits. Changer régulièrement l'huile afin de limiter l'accumulation de produits dangereux.

Changement des filtres de la machine

Le changement des filtres doit se faire sans mise à l'atmosphère de ces derniers. Pour certaines poudres inflammables (Al, Mg, par exemple), conserver les filtres sous une atmosphère de gaz inerte puis neutraliser sous l'eau les poudres déposées sur les filtres. Évacuer l'hydrogène produit lors de cette neutralisation par l'eau.

Tamissage des poudres récupérées

La manipulation des poudres lors de l'opération de tamissage doit être effectuée avec la même précaution que pour la production des pièces : transvasement en vase clos, emploi de machines étanches, récupération en vase clos, nettoyage par aspiration ou par essuyage (soufflage proscrit).

Gestion des déchets

Les déchets de poudres, les filtres et les déchets des produits chimiques annexes

doivent être traités de la même manière que les autres produits chimiques. Ils doivent être pris en charge par une entreprise spécialisée dans le traitement des déchets chimiques.

Maintenance de la machine

Toute intervention sur la machine doit être effectuée par du personnel compétent et formé sur les risques existants et les moyens de protection. Puisque les systèmes de sécurité de la machine peuvent être mis hors service lors de la maintenance, prendre en compte d'autres risques pouvant être encourus (rayonnement laser, atmosphère appauvrie en oxygène) et veiller à la consignation des fluides et énergies [3]. Enlever le maximum de poudre et de sous-produits en circuit fermé, avant d'accéder à l'intérieur de la machine. Ventiler l'intérieur de la machine et s'assurer que la ventilation générale de la zone est en fonctionnement. Utiliser des EPI. En plus de la prévention du risque chimique et du risque d'incendie/explosion, si le laser est la technique utilisée, employer des écrans de protection adaptés [4].

Nettoyage du poste de travail

L'ensemble des postes de travail (finition, découpe des pièces, pesée ou transvasement des poudres...) doit être maintenu propre. Un nettoyage par aspiration ou par essuyage est nécessaire (pas de soufflage).

Incendie/explosion

L'ensemble du matériel et des équipements susceptibles d'entrer en contact avec la poudre doit être adapté aux caractéristiques physico-chimiques de celle-ci, pour éviter notamment que ce matériel ne soit une source d'inflammation et ne génère un incendie ou une explosion. Une évaluation du risque d'explosion doit être effectuée à toutes les étapes décrites précédemment.

L'identification des zones où une atmosphère explosive peut se présenter (zonage ATEX) permet, par la suite, de définir les dispositions à mettre en place, notamment pour supprimer les sources d'inflammation (étincelle d'origine électrique ou électrostatique, flamme nue, surface chaude...) et choisir le matériel adapté à la zone.

Mettre en place un cloisonnement (mur/porte coupe-feu) entre les différentes zones présentant des risques d'incendie/explosion (stockage de matières premières, stockage des déchets, fabrication...) afin de limiter la propagation d'un potentiel incendie.

Les feux de poussières métalliques étant spécifiques (ils produisent de l'hydrogène en présence d'eau), pour combattre un début d'incendie, utiliser un extincteur prévu pour les feux de classe D (feux de métaux) et en complément une réserve de produit minéral sec (sable, ciment...). Ne jamais utiliser d'eau.

Élaborer des consignes de sécurité et former les personnes sur la marche à suivre en cas de découverte d'un incendie et d'évacuation des locaux. Tenir à disposition des services de secours (pompiers) les plans précis des différentes zones de travail avec les informations physico-chimiques sur les produits/sous-produits/co-produits contenus dans ces zones.

À partir d'une certaine quantité de poudre stockée et en fonction du type de poudre, l'entreprise est soumise à la réglementation ICPE (Installation classée pour l'environnement). Pour connaître les obligations de déclaration, d'enregistrement ou d'autorisation, l'entreprise peut contacter la Dreal (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) de sa région.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Principes généraux de ventilation. Guide pratique de ventilation n° 0. INRS, ED 695.
- [2] Les appareils de protection respiratoire. INRS, ED 6106.
- [3] Consignations et déconsignations. INRS, ED 6109.
- [4] Rayonnements lasers. Principe, application, risque et maîtrise du risque d'exposition. INRS, ED 6071.
- Impression 3D : des opportunités et des risques. *Hygiène et sécurité du travail*, n° 245, INRS, 2016.



Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris • Tél. 01 40 44 30 00 • www.inrs.fr • info@inrs.fr

Auteur : Cosmin Patrascu (INRS),
avec la participation de B. Sallé (INRS)
et B. Grange (Carsat Rhône-Alpes)
Illustrations : Alain Vilcoq (fig. 1 et 3)
Atelier Causse (fig. 2)
Mise en page : Béatrice-Anne Fournier